

**BSCCO 고온초전도선재를 이용한 고온초전도전원장치의 동작특성 해석**

안민철\* · 김호민\* · 윤용수\*\* · 고태국\* · 이상진\*\*\* · 한태수§  
 연세대학교\* · 안산공과대학\*\* · 위덕대학교\*\*\* · 기술표준원§

**Analysis of the Operational Characteristics of High-Tc Superconducting Power Supply Using by BSCCO Tape**

Min Cheol Ahn · Ho Min Kim · Yong Soo Yoon · Tae Kuk Ko · Sang-Jin Lee · Tae-Su Han  
 Yonsei Univ.\* · Ansan Univ.\*\* · Uiduk Univ.\*\*\* · Agency for Tech. and Standards§

**Abstract** - This paper deals with the fabrication and characteristic experiment of a high-Tc superconducting (HTSC) power supply using by Bi-2223 tape. The purpose of this research is to apply real HTSC load. This system consists of two heaters, an electromagnet, a Bi-2223 solenoid and a Bi-2223 pancake load. In the experiment, 17sec and 8.5sec were used for pumping period. Mechanism of the superconducting switch is used for heater-trigger. In experiment, the pumping-current has reached about 1.2A.

**1. 서론**

부피는 줄어들면서도 고자장을 낼 수 있는 초전도 자석을 이용한 응용기기는 꾸준히 연구 개발되어 오고 있으며 대표적인 것으로는 MRI, SMES, MAGLEV 등이 있다[1]-[2]. 그러나 이러한 초전도자석에 전원을 공급하는 장치로 상전도 전원장치를 사용하는 것은 효율이라는 측면에서 문제가 있다. 왜냐하면, 상전도와 초전도의 접합에서 오는 손실이 많을 뿐 아니라 초전도의 무저항 특성을 이용한 영구전류모드 운전할 수 없을 수 있기 때문이다. 이러한 이유로 초전도자석과 함께 냉각하여 사용되는 초전도전원장치가 필수적이라 하겠다. 지금까지 연구되어 온 전원장치는 대부분 저온초전도전원장치이며, 고온초전도전원장치는 YBCO bulk를 이용한 수준 정도만이 보고되고 있다[3].

본 논문에서는 Bi-2223 pancake를 부하로 갖는 실제 초전도자석 응용 시스템과 동일한 형태에 사용할 수 있는 고온초전도 전원장치를 제작하여 실험을 수행하였다.

**2. 본론**

**2.1 동작 원리**

초전도전원장치의 가장 기본적인 동작원리는 자속보존의 법칙[4]이며 이는 식(1)과 같다.

$$L \cdot I + AB_a = Constant \quad (1)$$

여기서, A는 초전도 폐회로의 면적이고 Ba는 폐회로 내에 인가된 자속이며 Ls는 폐회로의 자기인덕턴스이다. 식(1)은 무저항 폐회로와 쇄교하는 총 자계자속은 회로가 무저항 상태를 유지하는 한 변하지 않는다는 의미를 갖는다. 따라서 초전도 폐회로를 구성하고 이에 자속을 가두면 이에 의해 생기는 전류는 무저항 특성에 의해 영구히 흐를 것이다. 또 만약 이 폐회로 내에 기존의 자속에 추가된 자속을 가두는 작업을 한다면 그만큼의 외 전류까지 더해져서 더 많은 전류가 폐회로를 유지할 수 있는 것이다. 즉, 자속을 가두는 횟수만큼 전류는 더해질 것이고 이러한 개념을 이용하는 것이 초전도전원장치이다.

그림 1은 본 연구에 사용된 고온초전도전원장치의 개념도이다. 전원장치와 부하가 연결된 전체 시스템은 3개의 초전도 loop로 이루어져 있다. 그리고, 두 개의 히터가 Bi-2223주변에 감겨져 위치되어 있다. 본 시스템은 전류를 펌핑시키는 스위치로 히터트리거 방식을 사용하는 데 이 두 히터가 그 역할을 한다. 즉, 히터1, 히터2 그리고 전자석의 전류를 시간에 따라 순차적으로 조절함으로써 부하에 전류를 펌핑시키는 것이다. 그림 2는 시스템의 동작 순서도이다. 먼저 히터1에 전류를 흘려 이 부분을 상전도화시킨다. 열해석 시뮬레이션과 예비실험을 통해 선재를 quench시키기에 충분한 히터전류를 계산하여 흘리기 때문에 이 부분에서 quench가 발생하여 loop1은 스위치 off 상태가 된다. 이 상태에서 전자석에

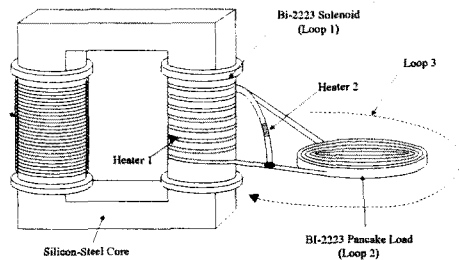


Fig 1. Schematic overview of HTSC power supply system

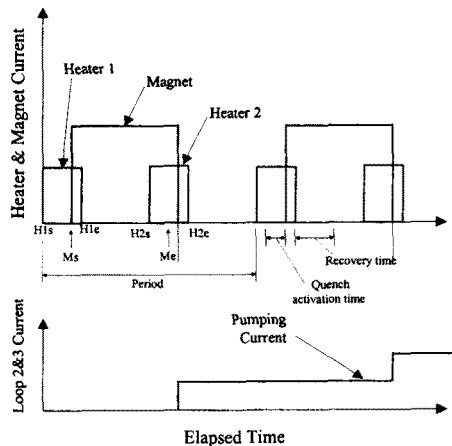


Fig. 2. Sequential diagram of HTSC power supply system

전류를 흘려서 철심을 통해 loop1으로 자속이 들어오도록 한다. 물론 히터1의 전류가 계속 공급중이기 때문에 이 자속이 폐회로에 가두어지지 않는다. 이렇게 자속을 만든 상태에서 히터1에 주던 전류를 끊어 quench를 회복시킨다. 회복되는 충분한 시간이 지난 후 히터2에 전류를 흘린다. 그러면 히터부분이 quench가 발생하여 가하던 자속은 loop3에 link된다. 이 상태에서 전자석에 가하던 전류를 갑자기 끊으면 자속의 변화를 막으려는 방향으로 emf가 발생하여 loop3에는 전류가 발생하게 된다. 이후 다시 히터2에 흘리던 전류도 끊어 quench를 회복시킨다. 이를 한 주기로 하여 반복하면, 부하에 충전되는 전류는 반복할 때마다 증가될 수 있는 것이다.

## 2.2 시스템 제작 및 실험

부하와 전원장치를 포함한 전체시스템은 액체질소 하에서 동작하도록 제작되었으며, 각 요소에 대한 자세한 제원은 표1과 같다.

그림 3은 고온초전도전원장치와 부하가 포함된 전체시스템의 모습이다. 시스템의 크기는 가로 세로 높이가 각각 600mm, 300mm, 190mm이다. loop1의 solenoid와 부하사이의 접합은 은화합물을 사용하여 soldering을 하였으며 초전도접합을 수행하지는 못하고 상전도접합을 수행하였다. 그리고, 스위치로 설계된 히터는 선재에 직접 감은 후 단열을 위하여 stycast을 덧칠하였다. 전자석의 철심은 규소강판은 적층하여 사용하였는데 전자석과의 공극을 최소화시키기 위해 원형으로 제작하여 2mm 이하로 만들었다.

부하에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 부하의 정 중앙에 홀센서를 위치시켰다. 또 히터와 전자석에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 shunt 저항을 이용하였다. 한편, 히터들과 전자석에 흘리는 전류를 그림 2와 같이 순차적으로 제어하기 위해 LAB-VIEW 프로그램을 이용하였다. 모든 신호는 절연증폭기와 DAQ board를 거쳐 PC에 표시되며 동시에 기록된다. 실험에서는 펄핑주기를 달리하여 펄핑주기가 17초인 모드1과 8.5초인 모드2로 구분지어 두가지 모드에서 각각 실험을 수행하였다. 표 2는 두가지 모드의 순서와 시간을 나타낸다.

## 2.3 실험 결과 및 고찰

그림 4는 시스템을 모드1로 동작시킨 실험 결과이다. 전자석에 0.01V와 0.03V의 전압을 걸었을 때, 180초 후에 부하에는 각각 0.58A와 1.2A가 충전된다. 이는 3.2mA/s와 6.7mA/s의 전류펄핑율을 나타내는 결과이다. 그림 5는 같은 조건에서 모드2로 실험한 결과이다. 100초가 지난 후에 각각 0.58A와 1.2A가 충전되어 전류펄핑율은 각각 6mA/s, 12mA/s이다. 두 모드를 비교해볼 때 모드2가 모드1에 비해서 전류펄핑율이 약 80% 증가함을 알 수 있었다.

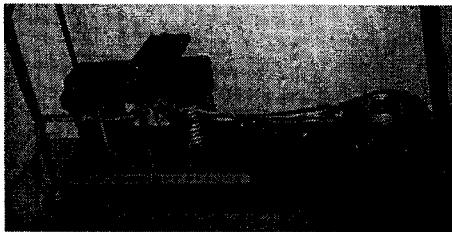


Fig. 3. Assembly of HTSC power supply system

Table 1. Specification of the HTSC power supply

요소	항목	제원
Bi-2223 pancake load	재질	Bi-2223/Ag
	권선수	115 turns
	내경,외경	40mm,75mm
	높이	9mm
	임계전류	0.6A at 77K
Bi-2223 solenoid (loop1)	재질	Bi-2223/Ag
	권선수	10turns
	임계전류	20A at 77K
히터 1, 2	재질	Ni-Cr
	저항	70Ω
전자석	코일	구리권선
	철심	규소강판 적층
	권선수	424 turns

Table 2. Time table for the experiment

		시간 [sec]	
		모드1	모드2
H2s	Heater 2 Start Time	0	0
Ms	Magnet Start Time	3	1.5
H2e	Heater 2 End Time	5	2.5
H1e	Heater 1 Start Time	9	4.5
Me	Magnet End Time	12	6
H1e	Heater 1 End Time	14	7
Period	Period End	17	8.5

실험을 통해서 얻은 펄핑전류가 낮을 수 밖에 없던 이유는 사용된 pancake 부하의 임계전류값이 약 0.6A 정도이기 때문이다. 그림 4의 경우 전자석에 0.03V를 인가한 경우 부하의 전류가 0.6A를 넘는 무렵부터는 펄핑이 잘 되지 않으며 한 주기 내에서의 기울기가 현저하게 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 BSCCO 부분보다는 모재인 은쪽으로 많은 전류가 흐르고 있기 때문이라고 볼 수 있다. 반면에 전자석에 가해진 전압이 0.01V인 경우에는 임계전류 부분인 0.58A에서 포화가 되어 더 이상 전류가 펄핑되지 않으며, 이 때에는 영구전류모드를 수행하여도 180초동안 약 0.14A의 전류만이 감쇄되는 특성을 보였다. 앞서 밝힌대로 본 실험에서는 Bi-2223선재간의 접합에서 solder를 사용하였다. 그럼에도 불구하고 임계전류 이하에서는 영구전류특성을 보여주고 있는 것이다. 따라서, 초전도접합을 하게 된다면 영구전류모드 운전이 가능할 것으로 사료된다.

그림 5에서도 역시 부하 pancake의 임계전류 때문에 최대 펄핑전류는 그림 4와 마찬가지로 낮아졌다. 하지만, 여기서는 모드1에서의 시간을 모두 절반으로 줄여 동작시킴으로서 시간에 대한 전류펄핑율을 향상시킨 특성을 얻어내었다. 모드별 시간간격을 결정하는 방법은 시뮬레이션과 예비실험을 통해 히터전류가 가해진 후 quench가 발생하는 시간과 히터전류를 없앤 후 quench가 회복되는 시간등을 얻어내는 것이 중요하다. 본 실험에서는 미리 결정된 시간에 의해 모드2를 최소의 시간으로 설정하고 이 값에 2배를 한 시간간격으로 모드1을 설정한 것이다.

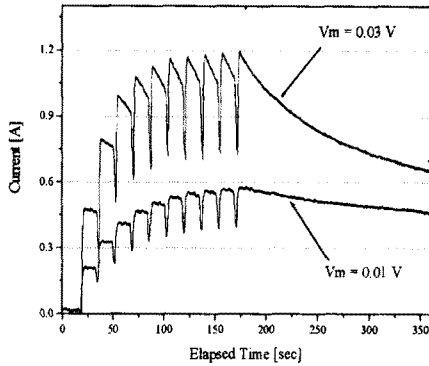


Fig. 4. Experimental result of Mode 1

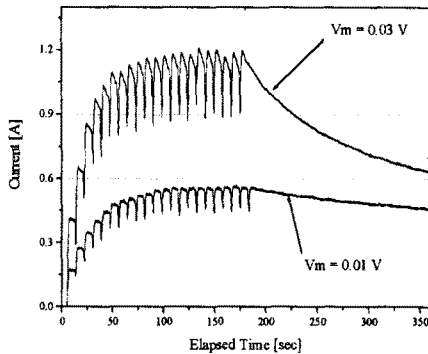


Fig. 5. Experimental result of Mode 2

결과적으로 말하면 모드2로 수행한 경우에 빠른 펌핑이 가능했으며, 모드 1에서도 펌핑이 가능했다는 것을 알아내었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 실제 응용 가능한 고온초전도 pancake 부하에 연결한 고온초전도전원장치 시스템을 제작하여 특성실험을 수행하였다. 실험에 사용된 초전도 부하의 임계전류값이 낮았기 때문에 1.2A까지 충전할 수 있었으며, 약 0.6A정도 충전한 경우에는 영구전류모드 운전을 수행할 수 있었다. 펌핑주기를 17초와 8.5초의 두 가지 경우로 나누어 실험을 수행한 결과 펌핑주기가 8.5초인 경우에도 펌핑이 가능했으며 이 때 전류펌핑율이 약 80% 증가함을 알 수 있었다. 본 실험에서는 초전도 접합을 사용하지 못하고 solder를 사용했으나, 앞으로 초전도접합을 이용하여 선재끼리 접합하면 접합저항이 현저히 줄어들어 만족할만한 영구전류모드를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 본 실험을 통하여 Bi-2223 부하를 가진 시스템에 사용할 수 있는 히터트리거 방식의 고온초전도전원장치를 제작하여 실험을 수행할 수 있음을 밝혔다. 그리고, 높은 임계전류값을 갖는 부하와 Bi-2223 선재를 이용하고 초전도접합을 사용한다면 보다 높은 펌핑 전류와 영구전류모드 운전을 기대할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. V. Suchtelen, J. Volger, and D. Houwelingen, The principle and performance of a superconducting dynamo, *Cryogenics*, vol. 5, no. 10, pp. 256-266, 1965.
- [2] O. K. Mawardi, S. A. Mueller and R. A. Michelotti, Brushless superconducting alternator, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 1, pp. 780-783, January, 1977.
- [3] Yong-Soo Yoon, Ho-Min Kim, Sang-Jin Lee and Tae Kuk Ko, Analysis of the operational Characteristics of a Heater-trigger type high-Tc superconducting power supply, *IEEE Transaction. on Appl. Superconduct.*, vol. 25, no. 5, pp. 4708-4714, December 1999.
- [4] A. Rose-Innes and E. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, pp. 3-15, 1978